

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1308

ヘリコプタによるビル火災消火の模擬実験
(その3・消火ヘリコプタの運用シミュレーション)

船引浩平・奥野善則
村岡浩治・若色薫

1996年10月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

ヘリコプタによるビル火災消火の模擬実験 (その3・消火ヘリコプタの運用シミュレーション)*

船引浩平*¹ 奥野善則*¹ 村岡浩治*¹ 若色 薫*²

Simulation Study for a Fire Helicopter (Part 3・Operational Simulation for a Fire Helicopter)*

Kohei Funabiki*¹, Yoshinori Okuno*¹, Koji Muraoka*¹, and Kaoru Wakairo*²

ABSTRACT

A piloted flight simulation is carried out to investigate operational subjects such as crew coordination between pilots and the boom operator, emergency operations, and acceptability of the interfaces. The simulated operations were so defined as to involve the whole operation from take-off to landing, including two sets of fire fighting operations and water recharging. It is concluded that the pilot-flying should request the pilot-not-flying and the boom operator to call out necessary information such as heading, distance from the building, and margin of the ejection boom control range. Furthermore the pilots concluded that a side mounted distance indicator which can be seen when looking outside the cockpit is effective in maintaining a proper distance from the building. A simulation for a one engine inoperative condition during fire fighting is also carried out. A series of other operations, such as the dumping of remaining water, retraction of the boom, and acceleration and escape from the building were also conducted smoothly.

Key Words: Helicopter, Fire Fighting, Flight Simulator

概 要

高層ビル火災消火のために既存の機体をもとに開発されたヘリコプタ(以下消火ヘリコプタ)について、運用面での問題点を抽出することを目的として飛行シミュレーション実験を実施した。これは離陸から火災現場への接近、消火作業、給水、現場への再接近、帰投といった一連の操作の中で、乗員間の連携のあり方やパイロット及び放水操作員のためのヒューマン・マシン・インターフェースの評価を行うものであった。実験の結果、操縦担当パイロットが主体となって高度、ビルとの距離、機首方位などの必要な情報を他の乗員から取得することにより、これら3名での消火作業が可能であることが示された。放水操作卓を含むその他のインターフェースについては、良好な評価を得た。さらに片発エンジン不作動時の実験を行い、操作手順に問題がないことおよび高度の損失が十分に小さいことなどが確認された。

1. 緒言

1.1 消火ヘリコプタについて

消火ヘリコプタは梯子車が使用できないような50m以

上の高層階での火災に対処すべく、ユーロコプター製 AS332<スーパーピューマ>を母機として東京消防庁により開発が進められているものである。以下に平成8年3月時点での消火ヘリコプタの概要について述べる。ただし、実機の開発はシミュレーション実験と並行して進められており、本実験の終了2カ月後に最初の飛行試験が行われた。従って、本実験の環境は飛行試験時のそれと若干異なっている。

* 平成8年8月14日受付(received 14 August 1996)

* 1 飛行実験部

* 2 制御部

(1) 構造

図1に消火ヘリコプタの構造の概略を示す。消火水タンク、左右一対の放水ブーム、湖などの水源上でホバリングしながら給水を行うための自己給水ポンプなどが、母機に加えて取り付けられる。

消火水タンクの最大容量は1.2トンである。タンク内部には4つの水位センサが取り付けられており、水の残量は4段階で放水操作卓に表示される。また、タンク下部には扉が設けられており、緊急時の消火水の投棄や森林火災などにおいて上空から散水することが可能である。

放水ブームは前方から側方100度まで旋回が可能であり、通常の飛行状態では前方に固定され、消火活動時には側方90度に展開される。また、旋回方向に20度、上下方向に15度の範囲で微修正が可能であり、旋回作動速度は最大6.6度毎秒、上下作動速度は最大3度毎秒である。ただし、旋回作動速度は上下作動速度に合わせて半分の値に切り替えることができる。ブームは伸縮式であり、格納時の長さは4.5m、伸展時の長さは7.2mである。消火水の有効射程は約20mとされており、以遠では水流の収束性が悪くなる。1.2トンの水を搭載した場合の放水時間は約2分である。また、ブームにはレーザー式の照準器が取り付けられている。

自己給水ポンプは機体下部から懸垂する方式であり、ホースの長さは6mである。タンクを満水にする所要時間は約1.2分である。

ビルとの距離を保つために、レーザー式の距離測定器が胴体下部と尾部に設置されている。これらはそれぞれ最短距離の障害物との距離を測定する。二つの測定値の

小さい方が乗員に対して呈示される。

ブームの展開や微修正、放水の開始、停止、消火水の投棄などは後席に置かれた放水操作卓で行われる。放水操作卓にはこれらのスイッチ類の他にシステムの状況を示すディスプレイが設けられている。

コックピットには消火水投棄スイッチ、ブームの格納ランプ、左右どちらのブームを使用しているかを示すランプが設けられている。

(2) 運用

ヘリコプタは火災の発生したビルに対して側面を向けて進入し、ホバリングする。これは、緊急時に離脱しやすいようにするためである。進入中にブームを90度方向に展開する。レーザーの照準を参照に機体位置を修正した後、放水を開始する。放水操作卓を操作する乗員はブームの方向を目標の窓に命中するように微修正する。放水が終了すれば、ブームを格納し帰投する。また、自己給水装置を用いて、近隣の池などで給水を行い、繰り返し消火活動を行うことも可能である。

1.2 消火ヘリコプタの飛行シミュレーション

平成5年度に実施したシミュレーション実験¹⁾では、風速による命中率の変化、パイロットと放水操作員のタスクの違いが消火性能に及ぼす影響、放水ブームのアクチュエータの性能による影響などを調査した。この実験では多くの有意義な成果が得られた一方、システムのモデル化やシミュレーション環境などに問題点が残されていた。そこで、消火ヘリコプタの開発計画の進展に伴って各種仕様やインターフェースなどが具体化しつつある

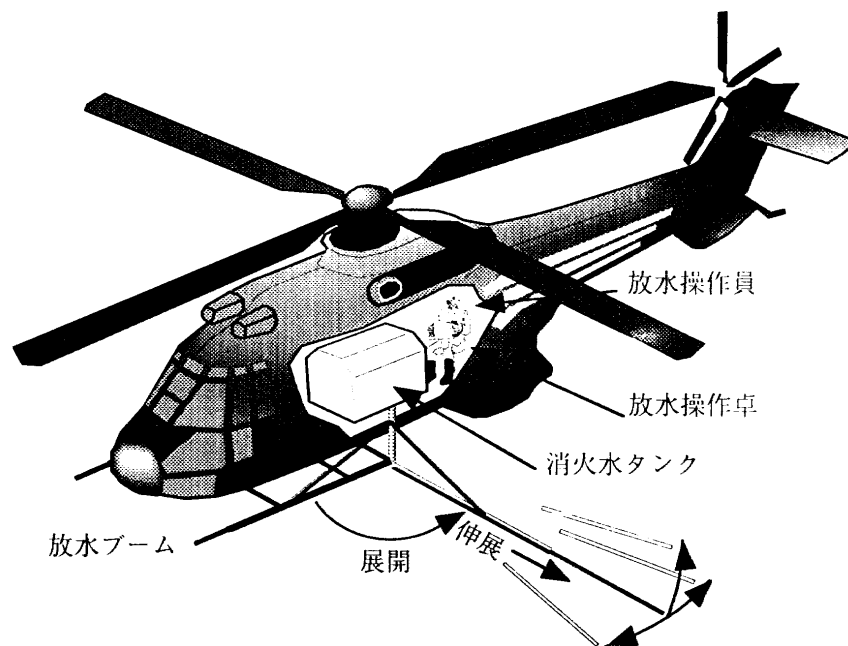


図1 消火ヘリコプタの構造

のを受け、2回目の飛行シミュレーション実験を実施した。

今回の実験環境は、前回の実験と比較し、以下の点で改良されている。

- (1) 視界模擬装置の性能が向上し、テクスチャ表示が可能となった。また、ドーム・スクリーンを使用することにより、視野角が広がった。また、サイクリック・レバーについて油圧反力装置が導入され、細かい調整が可能となった。
- (2) 飛行実験記録に基づいて数学モデルが改良され、簡易なエンジンモデルが導入された。
- (3) 放水システムの数学モデルを改善した。また、放水操作卓は実機搭載予定のものを模擬して作成した。
- (4) ビル風の数学モデルについて、風洞実験記録および離散渦法²⁾に基づいた2種類を用意した。
- (5) 東京消防庁の消防ヘリコプタの乗員が実験に参加した。

今回は、風が消火性能や飛行の安全性に及ぼす影響に加え、以下の項目についてシミュレーション実験を行った。

- (1) 運用シミュレーション

ビルへの接近、消火、退避、給水といった一連の作業

を模擬する中で乗員間の役割分担の調査や放水システムの評価などを行う。

- (2) 緊急時のシミュレーション

消火作業中のエンジン停止を想定し、消火水を投棄して現場から離脱する場合のシミュレーションを行う。

- (3) コックピット・インターフェースの評価

有効な消火活動のために必要であると考えられる側方距離計や消火システムの状況をコックピットに表示するディスプレイなどについて試作と評価を行う。

本稿では、これらの実験の成果について報告する。また、ビル風と消火性能および安全性との関係については文献3に示す。

なお、本稿では、高度や速度などの単位については、運用上の指標としての意味が重要であると考えられる場合に [kt] あるいは [ft] 表記を優先した。

2. 実験環境

2.1 実験装置

実験装置全体の構成を図2に示す。航技研が保有する汎用飛行シミュレータ設備のうち、ハーフドーム型の視

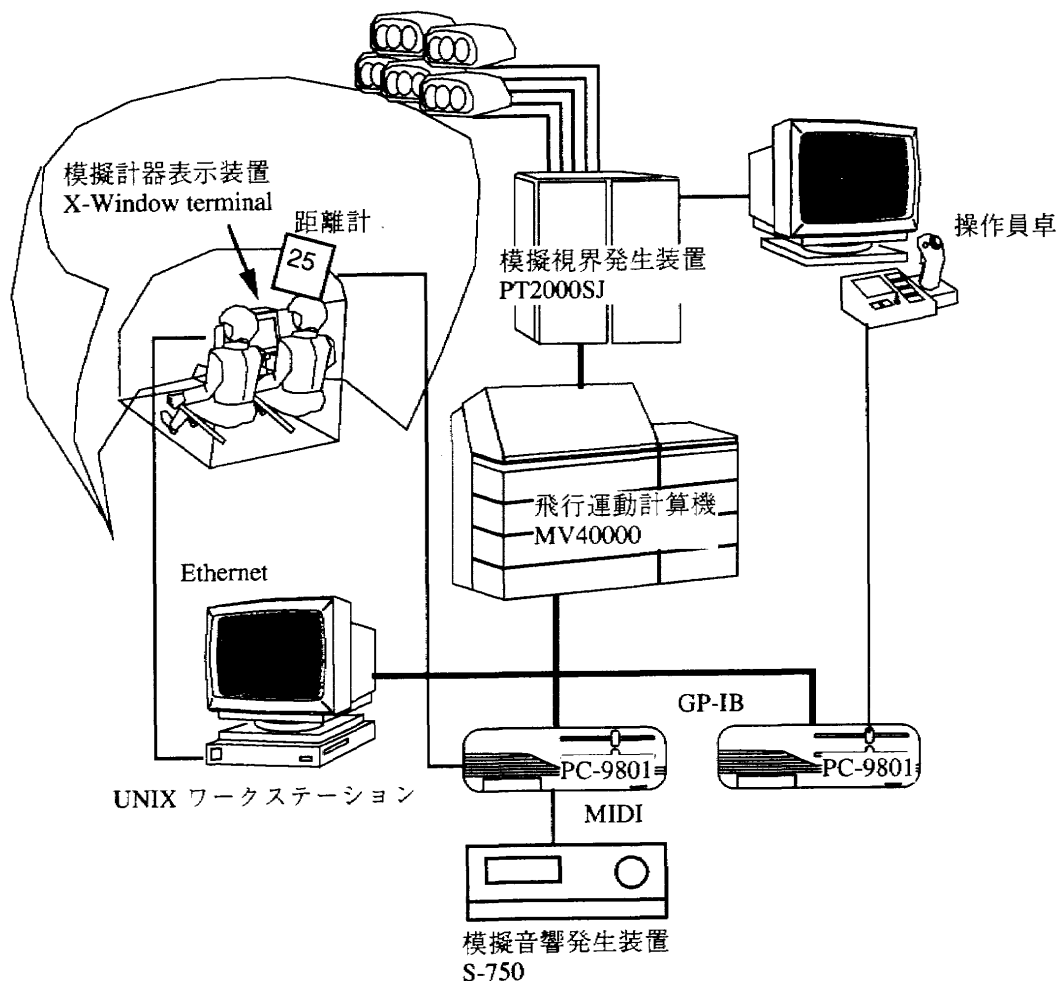


図2 実験装置

界装置を備えたヘリコプタ用コックピットを用い、これに必要な改修を加えて実験装置を作製した。このコックピットは動揺装置を備えていない。

正副パイロットはコックピットに、放水操作員は別室に座る。操縦は右席のみ可能とし、左席パイロットは計器の監視等を行う。パイロットおよび放水操作員はインターフォンを用いて会話できる。以降、右席の操縦担当パイロットをPF(Pilot Flying)、左席パイロットをPNF(Pilot Not Flying)と呼ぶ。なお、東京消防庁の運用では、右席パイロットが機長(pilot in command)であり、PFである。実機では風向によって左右のブームを使いわけることが可能であるが、今回の実験では、模擬視界の表示範囲の制限から右側に目標窓をとらえる状況のみを設定した。このため、風の状態や位置によっては背風を受ける場合もある。しかしながら、設定した目標窓に対応する位置においては、風の乱れやビルの角に回り込む風の成分などの関係から、著しい背風にはなっていない。

(1) 飛行運動計算機

飛行運動計算機として2 CPUを備えたオムロンアルファテック製MV40000を用いた。今回のシミュレーションでは2つのCPUを用い、ヘリコプタの飛行運動計算に一つ、ビル風と消火システムの模擬に一つのCPUを充てた。

(2) 視界模擬装置

視界模擬装置は模擬視界発生装置とスクリーン及びプロジェクタから構成される。模擬視界発生装置は、6チャンネルの画像を発生する能力がある。今回の実験では、コックピットの模擬視界の他に、放水操作員が機体横の窓から目標窓を見たときの映像が必要になるため、5つのチャンネルをコックピットに、1つのチャンネルを放水操作員席に充てた。

模擬視界は半径5mのハーフドーム型スクリーンに6つ(今回は5つ)のプロジェクタによって投影される。視野角は水平方向180度、垂直方向87度である。今回の実験では右側方の視野角を確保するため、図3のようにコックピットを中心より左に30度回転させた。従って、視野

角は左60度、右120度となった。ただし、左下方の1チャンネル分の視界は放水操作員用の視界に割り当てたため、コックピット側には表示しなかった。また、放水操作員用として右側方に縦50度横65度の視界を用意した。

(3) 操縦席

コックピットの外形および操縦装置はヒューズ式269型のものを用いている。ただし、右席のサイクリックレバーについてはMcFadden社製の油圧式操舵力模擬装置を装備している。コレクティブ・レバーについては摩擦力のみの調整が可能である。ペダルについては調整のパラメータがない。サイクリック・レバーについては反力、摩擦、慣性質量など、細かい設定が可能である。操縦装置に関しては、模擬対象とする機体について十分な資料が得られなかったため、当該機の飛行経験を持つパイロットの所見に従って調整した。また、左席の操縦装置は使用していない。計器盤はロビンソン式R-22型を模擬したものが備えられているが、今回のシミュレーションではエンジン故障の警報灯と消火水のダンプ用スイッチ以外は使用していない。

計器は右席正面に備えられたグラフィック端末上に描画した。表示の例を図4に示す。ここには飛行計器に加えて、距離計、ブームの位置、消火水の残量なども表示した。これらの消火システム関係の表示については5章で論じる。

(4) 模擬視界データベース

滑走路と建物の位置関係を図5に示す。目標となる窓の大きさは3m四方とし、ビルの3方(風上、風下、風横)の壁の高さ約200mの位置に配置した。

(5) 数学モデル

(a) ヘリコプタモデル

模擬対象とした機体は消火ヘリコプタの母機であるユーロコプター式AS332L型<スーパーピューマ>であった。機体運動は非線形6自由度の運動方程式を用いて計算し、ロータに働く空気力は運動量理論と翼素理論から求めている。

また、機体の標準装備であるSAS(Stability

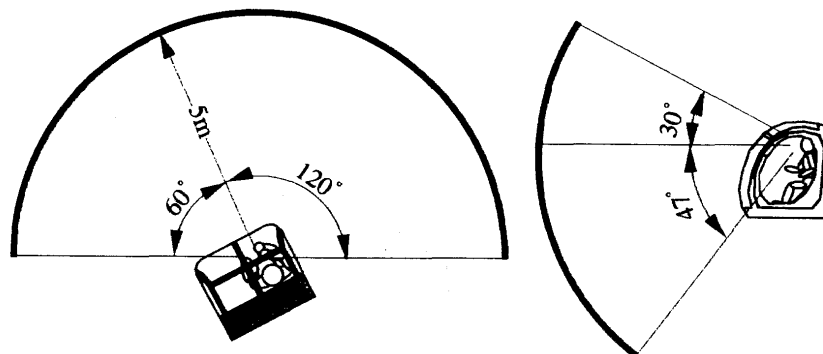


図3 シミュレータの視野角

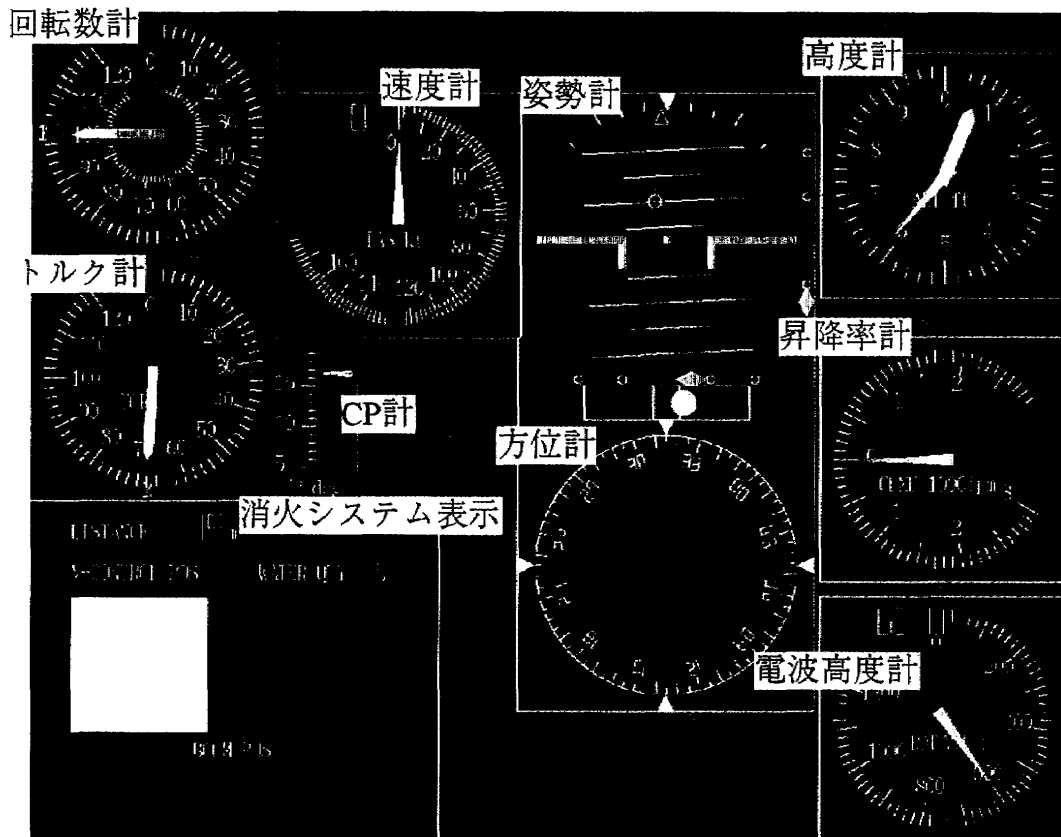


図4 コックピット計器表示

(b) ビル風モデル

ビル風の数学モデルとしては、次の2種類を用いた。これらのモデルはいずれもビルが無限に高いものと仮定しており、上下風を模擬していない。平面内成分に較べれば、上下成分の擾乱の影響は小さいと考えられるが、実際には、頂上付近での吹き上げ風の影響が大きいと言われており、高空から現場に進入するような運用については高い模擬度を有していないと考えられる。これらのモデルの詳細はそれぞれ文献2および3に示す。

(A) 風洞実験に基づくモデル²⁾

1/500の模型を用いて行った風洞試験で、図4に示したビルの周辺の3点に対応する3つの測定点でのデータを120秒分記録したものを、読み出すものである。従って、ビルからの距離によって風向や風速が変化することはない。また、モデルは2次元であり、上下風は模擬されず、角度成分も含まれていない。このモデルは、水の命中率やビルからの距離などを評価するような定量的な実験に用いた。

(B) 数値計算によるモデル³⁾

底面が50m四方で孤立した無限に高いビルを仮定し、離散渦法を用いた数値計算に基づくモデルである。任意の時間、場所における風速を計算できることが可能であるため、(A)と異なり、場所による風速風向の違いが模擬される。また、メインロータとテールロータ、メインロ

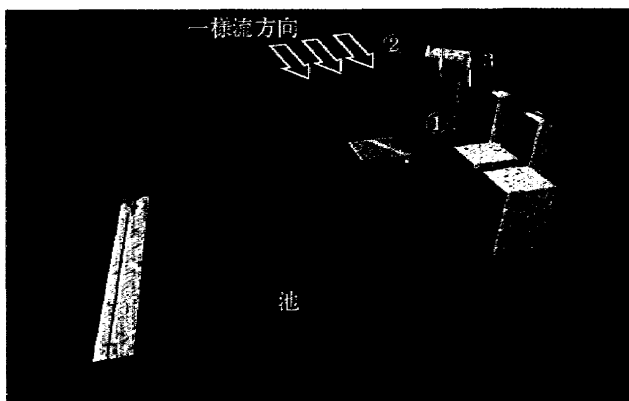


図5 実験空域

Augmentation System)およびASE(Automatic Stabilization Equipment)はホバリング時の諸元に基づいてモデル化しており、高速時の運動は厳密に模擬されていない。さらに、実機のヨー軸の方位保持機能はペダルのスイッチによって制御されるが、使用したコックピットのペダルにはスイッチが無いため、踏み込み量が一定値を越えたことをもってスイッチの代わりとしている。このため、パイロットからはヨー方向の操縦性が滑らかさに欠けるという指摘があった。

搭載する水量は満水で1,200kgとした。満水時の機体質量は8,600kgであり、放水につれて減少する。

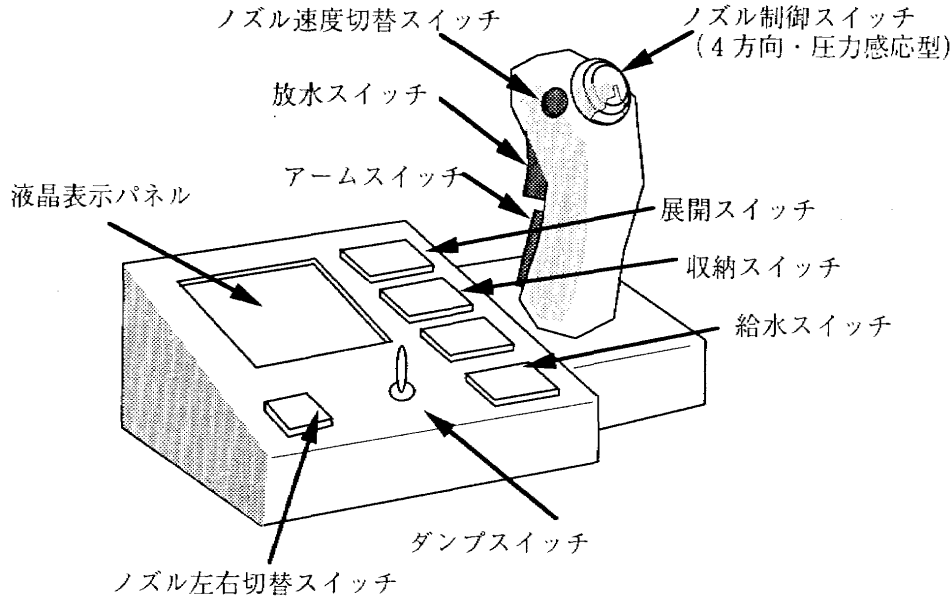


図6 操作卓

ータのロータ面の異なる数点で、その座標に対応する風を入力することにより、風による機体の回転運動が生じる。このモデルは、ビルへの接近から退避を含む全般的な飛行の模擬に用いた。

(C) 消火システム

消火システムの数学モデルは文献4中の供試体による実験のデータに基づいて作製した。実際のシステムとの大きな相違点は以下の通りである。

- ・水流は半径10mmの水滴として離散化した。水滴は初速度を与えられてノズルから放出され、重力、空気力の影響を受ける。
- ・水流の拡散は模擬していない。
- ・ブーム作動用のモータの立ち上がりの遅れは模擬していない。
- ・ブームの弾性変形は模擬していない。
- ・ブームが発生する空気力、慣性力は模擬していない。
- ・実験時間の圧縮のため給水の時間は5秒程度に設定した。実際には1分程度かかる。
- ・実機の放水トリガーは、引いている間だけ放水される。シミュレーションでは、浅く引いた場合と深く引いた場合で機能を分けた。浅く引いた場合は引いている間だけ放水される(テンポラリー)。また、深く引いた場合はトリガーを離しても放水は継続され、再び引くと止まる(オルタネート)。
- ・距離測定器は胴体と後尾の2カ所に設置されるが、今回は胴体のみで1カ所とした。なお、放水操作卓およびコックピットの距離計に表示されるのは、機体重心からビルまでの距離ではなく、その値からブーム長さを差し引いた値である。本稿で用いている「ビルからの距離」は距離計の表示に基づいている。

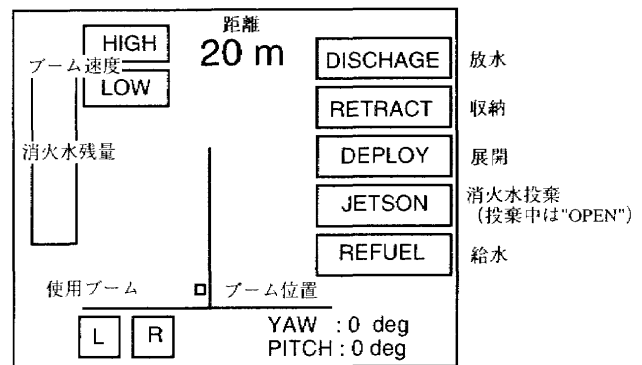


図7 操作卓表示

(6) 模擬音響発生装置

エンジン音、ロータ音等については、ユーロコプタ式AS350B型の機内で録音された音に基づいて作製した模擬音響を用いている。今回のシミュレーションでは、ビルまでの距離を自動的に読み上げる機能を追加した。この機能は、インターフェースとして評価する以外にパイロットの慣熟に用い、データ取得の際には基本的に使用していない。また、エンジン故障時の警報音を用意した。

(7) 放水操作卓

放水操作卓及び操作卓の液晶ディスプレイ上の表示は文献4に基づいて作製した。操作卓の外形を図6に、表示を図7に示す。

2.2 パイロットおよび放水操作員

東京消防庁のヘリコプタパイロット3名が参加した。3名とも当該母機について十分な飛行経験を持っている。また、放水操作員も同機乗り組みの整備員が担当した。

3. 実験1：消火ヘリコプタの運用模擬

3.1 目的と概要

本シミュレーション実験の目的は、離陸から現場への接近、消火作業、離脱、給水といった一連の消火作業の過程で、乗員間の連携や手順について問題点を抽出することである。ここでは一定の状況下での実験による乗員の所見や記録をもとに議論を行った。

3.2 方法

消火作業手順および乗員間の作業分担は、本実験に先立つ試行から、概ね以下のように定めた。

- (1) 離陸
 - (2) 目標ビル南方より接近
 - (3) ビルからの距離およそ100mで壁を右側に置いてホバリング
 - (4) PFからの指示により放水操作員がブームを展開
 - (5) 20m位置まで接近
 - (6) 基準方位および基準電波高度を確認した後、PFの指示により操作員が放水作業開始
- 窓に対する機体の前後および上下位置については放水操作員がPFに指示する。それ以外の距離、高度、方位などについては、PFがPNFに対して値を要求することを基本とする。
- (7) 放水終了後、PFの指示により操作員がブームを格納
 - (8) ブーム格納を確認後、消火現場から離脱
 - (9) 池を模擬した給水地点の上空でホバリング
 - (10) PFの指示で操作員が給水開始
 - (11) 終了後、離陸、消火現場へ再接近
 - (12) 消火作業終了後、滑走路へ進入、着陸

なお、本実験でのPNFの役割は、計器の監視や必要な場合にPFに対して諸元を読み上げることである。

以上の手順の放水作業の箇所(3)~(6)については実験2以降についても概ね共通である。

3.3 結果

実験で得られた知見について項目別に以下に示す。

(a) 放水操作卓の操作性について

操作性については特に問題は指摘されなかった。前回のシミュレーション実験および放水システムのモックアップでは、ブームの方向制御はON-OFFスイッチによって行っていたが、今回のセットアップでは感圧素子を用いたアナログ制御が可能となった。この感圧素子を用いた操作部は有効に機能していた。

(b) 放水スイッチについて

実機では、放水スイッチはテンポラリ・スイッチとし

て機能する設計であったが、このスイッチは2段式であり、シミュレーションでは、浅く押すとテンポラリ、深く押すとオルタネート・スイッチとして機能するように設定した。放水ポンプの立ち上がり特性により、水流が安定するまでには時間遅れがあり、放水を断続的に行うことは、必ずしも有効注水につながらない。このため、実験中に注水点が目標を大きく離れた等の理由により、放水を一時中止するようなことはなかった。むしろ、テンポラリで操作した場合、放水中はスイッチを保持している人差し指がずれて意図に反してに放水が停止することもあるため、オルタネートで操作の方が有効であった。また、テンポラリの機能は不要であるとのコメントも得た。なお、この結果に基づき、実機の操作方法はオルタネート方式に変更された。

(c) 操作卓の液晶表示装置について

操作員は目視によるブームの操作に注意を集中するため、液晶表示装置を常に監視することは難しい。ブームの作動範囲が限界に達した場合も、すぐには分からない場合がある。特に不具合を知らせる表示に関しては、別途専用の警報灯を用意するか、マスター・ワーニング・ランプを装備することを検討すべきである。ただし、用意した表示装置は実機搭載予定のものより小さく、視認性に問題があった。

(d) 水量表示について

実機に搭載されている水量表示は分解能が4段階にすぎないため、残りの水量を知る上で十分な参考にはならない。例えば風の乱れが大きい時など、ワークロードが高いと想像されるような状態では、パイロットは頻繁に水量の読み上げを要求したが、そうでない場合は、ほとんど要求していない。従って、水量表示の必要性についてはさらに検討が必要である。センサの改修をせず水量表示の分解能を上げるためには、単位時間当たりの放水量を一定と仮定して時間積分を行うことが有効であると考えられる。

(e) ブーム速度切替スイッチについて

ブームの旋回方向の速度についてはHIGH(6.6deg/s)とLOW(3deg/s)の2段階の切り替えが可能である。実験中では、常にHIGHの状態ではブームの操作を行ったが、ブームのコントローラがアナログタイプであり、微調整が容易であったため、問題はなかった。また、この場合、上下方向の最大速度は3deg/sであり、上下と旋回では作動速度が異なることになるが、操作員に違和感はなかった。ただし、実験ではブームの変形を考慮に入れておらず、実際にはHIGHの状態では慣性力の影響が問題となる可能性がある。

(f) 情報の呼称について

実験では、距離、高度、方位などの情報については、

PFがPNFあるいは放水操作員に随時要求する方式を採用した。それ以外に、特に必要と思われる情報はPNFあるいは操作員からPFに対して読み上げた。これは、不要な音声によって機内通信回線のブロッキングを防ぐためである。この方法による問題点は特になかったが、PFは距離に関しては頻繁に数値を要求しており、横を向いたまま視野に入るような距離計の設置が望まれる。

(g) PFの目標について

文献4によれば、安全上の理由からPFは積極的に水を目標に当てることをせず、定点ホバリングに専念すべきであるということになっている。しかし、これまでの実機による模擬消火実験、シミュレーション実験、そして今回のシミュレーション実験でもPFは常に水を目標に当てるようにホバリングを行った方が効率が良いことが示されており、また、安全性にも問題がなかったことから、運用方式の前提を見直す必要があると考えられる。

(h) 目標の位置について

上記(g)に関連し、目標はPFの真横よりも約10度前方に置く方がPFの主観的なワークロードが低い。今回は機体の右側にビルの壁を置く場合のみを評価したが、左側の場合は左席パイロットなどにより視界が制限されるため、斜めに目標をとらえる方がより有効であると考えられる。消火の効果に影響がなければ、このような運用方法も検討すべきである。ただし、真横の場合でも作業は可能であり、目標窓への命中率の違いも見られなかった。

4. 実験2：エンジン故障時のシミュレーション

4.1 目的と概要

消火作業中のエンジン故障時の操作項目としては以下のようなものが挙げられる。ただし、これらのうち、最後の2項目についてはシミュレーションで模擬されていないため、ここでは論じないこととした。

- ・放水の中止、ブームの格納
- ・消火水の投棄
- ・加速しつつ現場から離脱
- ・エンジンおよび発電機の停止操作
- ・エンジン再起動操作

これらの中で、消火水の投棄および加速しつつの離脱はエンジン出力の低下した機体にとって、性能に重大な影響を及ぼすものであり、最優先で実行されなければならない。特に消火水の投棄については、緊急事態として周辺状況の如何によらず実施できることが望まれる。

従って、ブームの格納は投棄および離脱を行いながら実施することになるため、格納終了までの間に機速がブームの構造上の限界を越えないことを確認する必要がある。手順上エンジン停止から投棄までの間には確認作業等が必要であり、さらに投棄の完了には6秒程度を必要

とすることから、この間の高度の低下についても考慮する必要がある。

この実験では上記の作業手順の確認を行うとともに、ブーム格納までに達する速度及びその間に発生する最大加速度の測定、正の上昇率を得られるまでの高度損失について調べた。

4.2 方法

エンジン一発停止時の操作手順を以下のように想定した。これらの手順は連続的に行われる。

- ・警報(警報灯・音)とエンジン計器によってエンジン故障を確認、PNFがエンジン故障の発生を呼称
- ・PFがPNFに消火水の投棄を指示
- ・PFが放水操作員に放水の停止とブームの格納を指示
- ・加速しつつ消火現場から離脱
- ・PNFが投棄の終了とブームの格納を確認

なお、一発停止時のエンジン出力は消火水の投棄完了時にかろうじてホバリングが可能ないように設定した。また、エンジン・モデルは、エンジンの出力がロータ回転速度の変動に1次遅れて追従すると仮定した。合計3回の試行を行い、そのうち2回分を記録した。

4.3 結果

エンジン停止から上昇までの時歴の例を図8に示す。

このケースでは時刻0秒で放水を開始しており、エンジン・トルクのグラフに見られるように約17秒でNo.2エンジンの故障が発生、その2.4秒後にはパイロットはロータ回転数の低下を防ぐためにコレクティブ・レバーを約3%下げ、同時に機速を得るために機首を約5度下げている。約22秒では、PFの呼称に基づいて放水操作員がブームの収納を開始、同時にPNFは消火水の投棄を実施している。27秒には機体は上昇に転じており、約55秒で速度も50kt(26m/s)に達してほぼ定常上昇に入り離脱を完了している。この間、No.1エンジンの出力は臨界値の120%に達しているが、その後、機速の増加に伴ってコレクティブピッチが下げられ、58秒には100%まで回復した。

このケースではエンジン停止から上昇の開始までに約10秒かかっており、その間の高度損失は18mであった。実際の運用での手順では、これに発電機の停止等の作業が加わることによる所要時間の増加の一方で、訓練および手順の確立による所要時間の短縮が考えられる。これらのことを考慮して、エンジン故障時の高度損失をおよそ20mと推定することは妥当であると考えられる。消火ヘリコプタの運用範囲は高度50m以上と想定されるため、特に地上に障害物がない限り、高度損失の問題はない。なお、このケースでは最大の機速が約50kt(26m/s)であり、多くのエネルギーが上昇に使われているが、実際の運

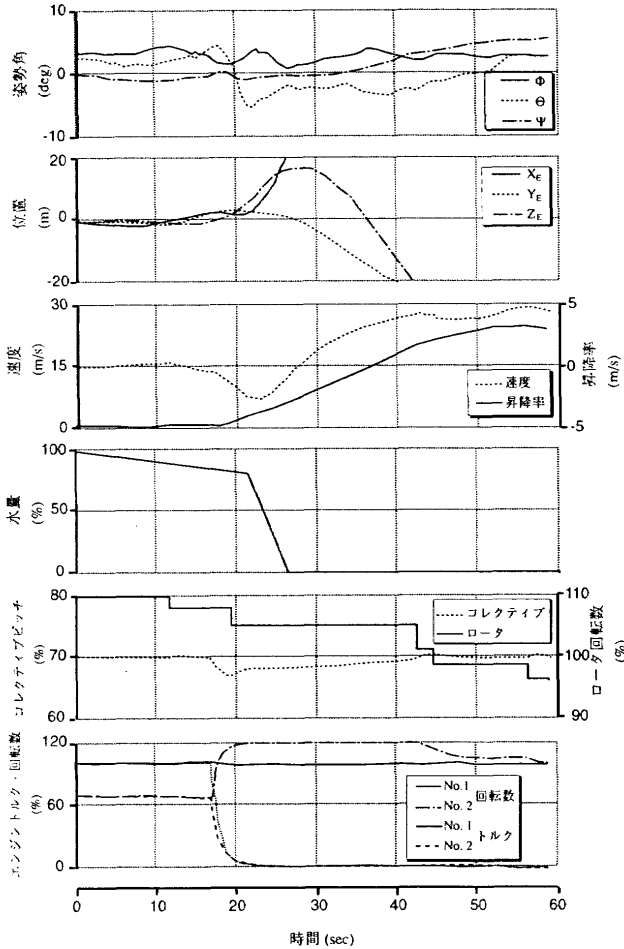


図8 エンジン片発停止時の時刻歴

用から類推すれば、約60kt(31m/s)まで加速した後、上昇に転じることが一般的であると考えられる。

エンジン故障発生からブームの格納完了までは16秒かかっており、この間に達した最大速度は27kt(14m/s)である。ブーム展開時の許容最大速度は60kt(31m/s)であり、許容範囲に収まっている。従って緊急離脱時には、ブームの格納機能が正常である限り、速度制限を意識する必要はないと考えられる。

以上のことから、エンジン故障時に関する機器・装置構成および手順については大きな問題点は見られない。

5. コックピット・インターフェースの評価

消火作業を行うためには通常の飛行計器に加えて消火システムに関するいくつかの情報呈示が必要になると考えられる。初期設計段階では、コックピットには正面計器盤に距離計のみが設置されることになっていた。本シミュレーション実験では、これ以外にも必要と考えられるコックピット表示について試作し、評価を行った。

5.1 側方距離計の評価

5.1.1 装置の概要と目的

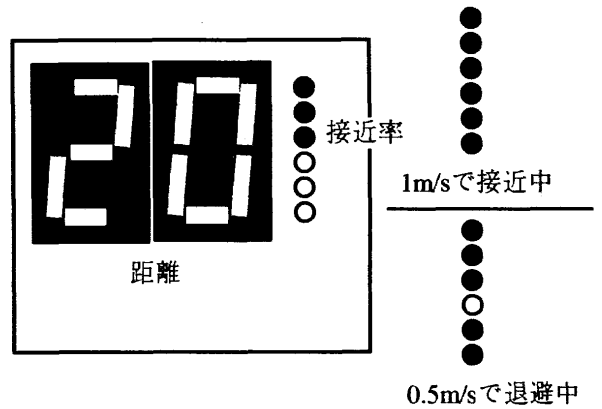


図9 距離計

消火ヘリコプタの基本構想では、PFは基本的に正面を見ながら定点ホバリングに専念し、積極的に消火活動は行わないことになっていた。しかし、飛行実験および飛行シミュレーションにより、有効な消火を行うためには、パイロットはほとんど真横を向いてホバリングを行うことが必要であることが分かった。従って、正面計器盤を走査するゆとりはなく、方位、高度、ビルからの距離などは、PNFから音声によって得ることになった。特にビルからの距離については、PFはPNFに対して頻繁に情報を要求することが分かった。このようなやり方では、情報の要求から回答まで時間差があることや、頻繁に機内通信回線が使用されることによるブロック時間の増加、パイロットのワークロードの増加など、消火性能を低下させる要因が多く認められる。そこで、側面の窓枠に距離計の表示部を取り付け、PFがビルを見ながらでも視野に距離の表示が入るような装置を試作しこれを評価した。また、ビルに対する接近率も併せて表示した。

この距離計の外観を図9に示す。値は0mから99mまで、1m単位で表示される。10m以下になると表示は点滅する。また、接近率は、0.5m/sで一つ、1.5m/s以上で三つのLEDが点灯する。近づいている場合は黄色、離れている場合は緑である。なお、一回目の実験の結果をうけて改修を行い、距離の数値の色が緑、黄色、赤の3段階に変化できるようになったが、色の識別性は不十分であった。

5.1.2 評価手順

側方距離計を装備した場合としない場合について消火作業のシミュレーションを行った。ビル横でホバリングを開始し、約2分間の消火作業を行った。

5.1.3 結果

側方距離計を使用しない場合と使用した場合についての壁からの距離の時歴を図10に示す。距離計を使用しな

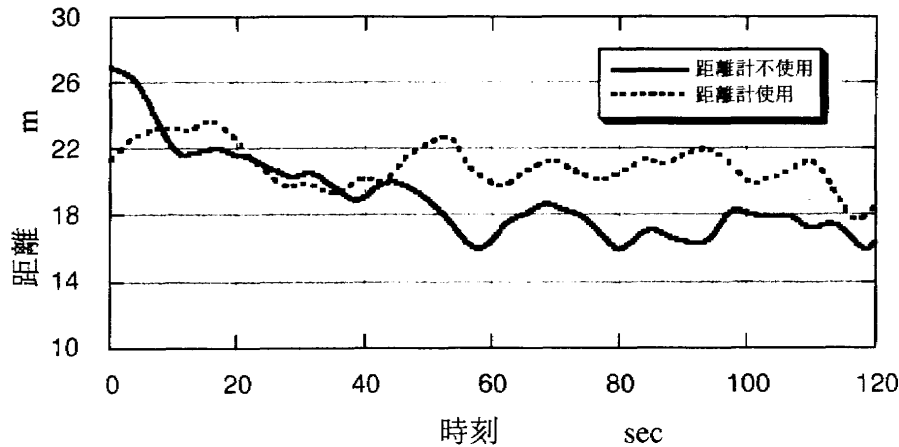


図10 距離計の有無による距離の時刻歴

い場合は5m以上の範囲で値が変動しているのに対し、距離計を使用した場合には23mから20mの範囲に収まっている。特に後者の場合は、PFは20mの値を意識して操作を行っていることがうかがえる。今回の実験では水流の拡散を模擬していなかったため、距離の保持に関するタスクは目標への命中に比べて厳しくなかった。しかし、実際には有効な消火のために、かなり厳密に距離を一定に保つことが要求される可能性もある。その場合には側方距離計の有効性は大きい。また、距離計を用いない場合にはPFがPNFに対して距離を10秒に1度程度回尋ねたのに対し、距離計を用いた場合には一度も尋ねておらず、回線のブロッキングに関する問題は軽減されると考えられる。以下、パイロットの評価をもとに結果をまとめる。

(1) 見やすさについての評価

今回の実験装置の関係上、距離計はPFの目の至近に設置された。このため、ビルと距離計のスキャンを度々行うことが生理的な負担になることが懸念された。しかし、所見によれば、PFは通常は周辺視によって距離計を見ており、時折、値を確認する程度であるので、目の負担は低いという結果であった。

(2) 接近率計についての評価

接近率計は、距離計が数値によるデジタル表示で値の傾向や微量の変化がわかりにくいため、それらを補うために設置した。しかし、パイロットの所見によれば、距離計の数値の変化や視界からそれらの情報は十分に得られるため、接近率計は重要性が低いとのことであった。接近率計を動作させない場合でも、性能上の違いは見られず、特に所見もなかったため、接近率計は不要であると結論した。

(3) 距離計に対する警報機能の付与

距離計の表示色を距離によって変化させることについては、パイロット間にも意見の相違があり、統一した方

式を示すことができなかった。関連する所見を整理すると以下ようになる。

- ・有効な消火のための指標となる20mの値が分かるとよい
- ・距離計の表示が15mを切ると、自ずと目標窓への命中より壁からの退避を優先する。

これらの所見に加えて、横風突風に対する安全限界10mを考慮して1)、次のような表示を提案したい。

- (a) 20m 以上では緑
- (b) 15m以上19m以下ではアンバー
- (c) 10m以上14m以下では赤
- (d) 9m以下では赤の点滅

なお、(c)および(d)に関しては、同じ10mでも接近しつつある時と遠ざかりつつある時では危険度が異なるため、距離計の値を処理し、壁への接近率を加味して色の変化を生じさせることが有効であると考えられる。ただし、20mの値は安全余裕というより有効な消火作業のための指標であるため、緑からアンバーへの変化については接近率を加味することを避けるべきである。

また、20mは指標値であり、20m以下になることを禁止するものではない。20m未満でアンバーになることが、パイロットに対して危険領域としての意識を発生させるとすれば、別の方法で20mの値を認識させなくてはならない。これについては今後の検討が必要である。

(4) 総合評価

所見によれば、必要な情報が常時得られるという点で側方距離計が有効であり、実機への設置が望まれるとのことであった。消火作業における距離計は巡航での速度計に匹敵する重要な情報であり、飛行のための安全余裕と有効な消火のための指標の両方を与えるものである。上記の点を考慮し、側方距離計の有効性を結論するとともに、実機への設置を提案する。

5.2 音声による距離の呈示

5.2.1 装置の概要と目的

前項の側方距離計と同様に、パイロットが消火作業中に常時距離を参照できることは有効である。そこで、音声によって1m単位で距離を自動的に呼称し、パイロットに呈示する装置を試作し、評価した。

装置は模擬音響発生装置を用いた。ひとつの音響チャンネルに女声で29mから15mまでの数字を英語で読み上げたものを録音し、ビルからの距離が変化すると再生するようにした。

5.2.2 評価手順

5.1.1と同様に行った。

5.2.3 評価

パイロットの所見によれば、風が弱く、安定した状態では非常に有効であった。しかし、風の乱れが大きく、距離が大きく変化する場合には耳障りであり、むしろ作業の妨げになる。もし、実用化するのであれば、状況によって分解能を下げたり、抑制したりといった改良が必要であると考えられる。また、5.1の側方距離計が装備されれば、当該の機能は不要であるとの評価を得た。

5.3 消火システム状態のコックピット表示装置

5.3.1 装置の概要と目的

計画によれば、コックピットに表示される消火システム関係の情報は距離だけであり、水の残量、ブームの位置などは表示されない。これらの情報は放水操作員卓で参照可能であるため、コックピットから後席に情報を要求したり、操作手順のなかで操作員からシステムの状態を読み上げるようにすることも可能であるが、緊急事態

などでパイロットが直接状態を確認したい場合もありうると思われる。今回の実験では、実験の便宜をはかる意味も含めて、終始これらの情報をコックピットに表示した。表示の例を図11に示す。また、これらの表示の必要性を評価するため、エンジン故障模擬を含むいくつかのケースにおいて距離計のみを残して表示を消して評価を行った。

5.3.2 評価

(1) ブーム位置

この表示は横に90度展開した位置を基準として、前後、上下方向のブーム位置を表したものである。ブーム位置が図の左側一杯に達した場合は、前方限界であるため、操作に余裕を持たせるためには機体は前方に移動しなければならないことを示す。

PNFはこの表示を見ているが、窓に対する相対位置については放水操作員からPFへの指示があるため、PNFがこの表示に基づいてPFに対して指示をすることはなかった。したがって、この表示の必要性は低いと考えられる。

(2) ブーム水平面角度

この表示は旋回面でのブームの角度を表したもので、旋回中はアンバー、ロック状態では緑で表示される。

(3) 水量表示

パイロットの所見によれば、水量は操作員から適宜報告されるため、通常の作業では水量表示は不要であるとのことであった。しかし、エンジン故障時の模擬では水の投棄操作はコックピットで実施するにも関わらず、その結果を確認することができない。エンジン故障による緊急離脱時には、機体に懸かっている負荷を認識する必



図11 消火システムディスプレイ(その1)

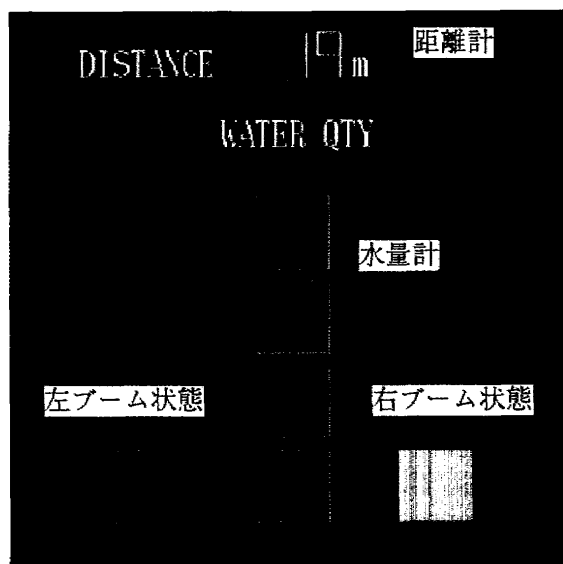


図12 消火システムディスプレイ(その2)

要から、水量表示ないし投棄完了を示すランプ(およびそのためのセンサ)は必要であるとの結論に達した。

(4) 総合評価

上記の評価に基づいて、より実現性のある表示フォーマットを作成し、評価した。これを図12に示す。中央の4つの青いランプは放水操作卓の水量表示に対応するものである。左右のランプは前方にロックされた状態で緑、それ以外ではアンバーに点灯する。パイロットからは、この表示により必要十分な情報を得られるとの評価を得た。

6. 飛行試験結果について

平成8年2月に消火ヘリコプタの飛行試験が実施された。これは、消火システム装着時の耐空性や個別システムの動作を確認するためのものであり、実際の消火作業に即した運用試験は行われなかった。ここでは、それらの個別の操作に関するパイロットの所見を中心に、シミュレータの模擬の妥当性とシミュレーション実験で得られた結果の検証の観点から議論する。

(1) システム装着による影響

シミュレータでは、ブーム質量の慣性モーメントへの影響およびブームの発生する空気力を模擬していない。従って、展開・収納による機体特性の変化も考慮されていない。パイロット所見によれば、システムを装着した場合、母機の状態と較べてホバリングでの操縦特性に違いが感じられるとのことであった。また、ブームを格納した状態での60kt近辺の水平直進飛行では、必要出力が母機に較べて大きいということであるが、定量的なデータは得られていない。

(2) ブーム展開時の飛行運動について

ブーム展開時と格納時についての操縦特性上の違いは感じられないとのことであった。ただし、低空での飛行運動やブームを展開した状態での着陸ではブームと地面との干渉に配慮する必要があるため、主観的なワークロードは高い。シミュレーションでは対地高度感が必ずしも十分でないことから、現時点では十分な模擬度が得られていない。また、実現も難しいと考えられる。

(3) ブームおよび水流の見え方について

ブームおよび水流のコックピットからの見え方はシミュレータとよく一致しているとの所見を得た。

(4) 放水時の反動について

シミュレータでも消火水の反力は模擬されているが、パイロットは反動を感じておらず、特に反動を意識した操舵もしていなかった。これは飛行シミュレーションが固定座席で行われたことも影響していると考えられる。実機の場合でも機体の運動に影響を及ぼす反動は感じら



図13 飛行試験風景(自己給水模擬)

れず、操舵にも影響はないとのことであった。ただし、放水開始の瞬間にブームが伸展する再の衝撃がわずかに感じられるとのことである。これらの所見から、放水反力に関してのシミュレータの模擬は妥当であったと考えられる。

(5) 消火水の投棄について

定点ホバリングしながらの消火水の投棄については、シミュレータと実機とで良好な一致が見られるとのことであった。実機においても、投棄瞬間の反動はなく、重量の変化によって高度が徐々に変化する様子が観察された。

(6) 自己給水について

シミュレーションでは給水時の模擬はほとんどされていない。飛行試験では、実際の給水は行わず、ポンプを懸架した状態で池の上空約2mでの定点ホバリングを行った(図13)。当初、低空での水上でのホバリングでは水の巻き上げによるコックピット視界への影響が懸念されていたが、実際には良好な視程が確保されていた。

全体として、機体の運動を含めたシミュレータの模擬は実機に近いとの所見を得た。また、(4)、(5)に述べたように、放水時や消火水投棄時における体感は小さく、動揺装置が無いことが操縦に著しい影響を及ぼす可能性は少ないといえる。

7. 結言

消火ヘリコプタについて、機体、消火システム、ビル風等を模擬した飛行シミュレーションにより、システムの評価と問題点の抽出、手順の確認などを実施した。得られた主な成果は以下の通りである。

- ・放水操作卓の機能と操作性は概ね良好であることが確認された。
- ・PF、PNF、放水操作員の3名での作業が可能であることが確認された。また、乗員間の協調と情報の伝達についても大きな問題がないことが確認された。

・エンジン故障時の模擬を行い、そのときの手順と高度損失の目安を得た。また、模擬の範囲内で、離脱時にブームにかかる負荷が許容範囲内であることが確認された。

・飛行試験と対照した結果、シミュレータ実験が良好な模擬度をもっていることが分かった。

また、特に以下の項目について、これまで検討されてきた運用方法や装置について見直す必要があることが指摘された。

・有効な消火を行うためには、PFは専ら目標点を見ながらホバリングを行う必要がある。従って、ブームの基準位置は真横よりやや前方が望ましい。

・上記に関連して、目標点を見ながらも視界に入るような距離計表示部の設置が望まれる。

・コックピットには消火水の投棄とブームの格納を確認できるような表示装置ないし、ランプの設置が望まれる。

なお、この実験のために開発したシミュレーション装置は、消火ヘリコプタの主要な作業の範囲内で、ある程度の模擬性能を有しており、今後も手順の策定や訓練等に使用することが可能であると考えられる。

謝辞

本実験は航空宇宙技術研究所と東京消防庁との共同研究「消防ヘリコプタの安全基準に関する研究」および東京消防庁「消防ヘリコプタの消火活動に係わる検討委員会」の活動の一環として行われたものであり、実験の実施に関しては、関係各位に多大なるご協力をいただいた。シミュレーション実験の実施にあたっては、東京消防庁装備部航空隊のパイロットおよび整備士の方々にご参加を

頂いた。(株)扶桑商事には実験用の装置を貸して頂いた。当所制御部研修生の富田氏には音声警報装置の作成に当たってご協力を頂いた。あわせて感謝の意を表したい。

文献

- 1) 奥野善則, 船引浩平, 齋藤茂, 原田正志; ヘリコプタによるビル火災消火の模擬実験, 航空宇宙技術研究所報告TR-1269, 1995.
- 2) 原田正志, 奥野善則; ヘリコプタ飛行シミュレータのためのビル風モデル, 航空宇宙技術研究所報告TR-1311, 1996.
- 3) 奥野善則, 船引浩平, 原田正志; ヘリコプタによるビル火災消火の模擬実験(その2・消火効率安全性に及ぼすビル風の影響), 航空宇宙技術研究所報告TR-1293, 1996.
- 3) 消防ヘリコプタによる消火活動に係わる検討報告書(平成6年度), 東京消防庁, 1995.
- 4) 奥野善則, 赤松重樹, 齋藤茂, 原田正志; 風洞実験によるビル風のシミュレーション-消火ヘリコプタの安全基準に関する基礎実験-, 航空宇宙技術研究所資料TM-685, 1995.
- 5) 原田正志, 齋藤茂, 奥野善則; 大型ヘリコプタによる飛行特性計測試験, 第32回飛行機シンポジウム講演集, 1994.
- 6) 川原弘靖, 若色薫, 渡辺顯, 船引浩平; 飛行シミュレータ用ハーフトーム型視界表示装置の概要と評価, 第33回飛行機シンポジウム講演集, 1995.

航空宇宙技術研究所報告1308号

平成8年10月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) 〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段北1-7-8

Printed in Japan